

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)



EPO-BERLIN  
04-07-2003

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:**

102 19 054.2

**Anmeldetag:**

24. April 2002

REC'D 16 JUL 2003

WIPO PCT

**Anmelder/Inhaber:**

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., München/DE

**Bezeichnung:**

Verfahren zur Bestimmung der räumlichen  
Koordinaten eines Gegenstandes

**IPC:**

G 01 B 11/25

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 21. Mai 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
im Auftrag

Wallner

Pfenning, Meinig & Partner GbR

Patentanwälte  
European Patent Attorneys  
European Trademark Attorneys  
Dipl.-Ing. J. Pfenning (-1994)  
Dipl.-Phys. K. H. Meinig (-1995)  
Dr.-Ing. A. Butenschön, München  
Dipl.-Ing. J. Bergmann\*, Berlin  
Dipl.-Chem. Dr. H. Reitzle, München  
Dipl.-Ing. U. Grambow, Dresden  
Dipl.-Phys. Dr. H. Gleißer, München  
Dr.-Ing. S. Golkowsky\*\*, Berlin  
\* auch Rechtsanwalt  
\*\* nicht Eur. Pat. Att.

80336 München, Mozartstraße 17  
Telefon: 089/530 93 36  
Telefax: 089/53 22 29  
e-mail: muc@pmp-patent.de  
10719 Berlin, Joachimstaler Str. 10-12  
Telefon: 030/88 44 810  
Telefax: 030/881 36 89  
e-mail: bln@pmp-patent.de  
01217 Dresden, Gostritzer Str. 61-63  
Telefon: 03 51/87 18 160  
Telefax: 03 51/87 18 162  
e-mail: dd@pmp-patent.de

Berlin,  
24. April 2002  
Bt/Ha-us-FhG  
02/38039-IOF

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT zur Förderung der angewandten  
Forschung e.V.  
Leonrodstraße 54, 80636 München

---

Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten  
eines Gegenstandes

---

## FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT der angewandten Forschung e.V.

## Patentansprüche

- 5            1.    Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes, bei dem der Gegenstand mit einer Projektionsvorrichtung aus mindestens zwei Richtungen mit Lichtmustern beleuchtet wird, und die projizierten Lichtmuster auf dem Gegenstand mit einer zweidimensional auflösenden ersten Aufzeichnungsvorrichtung punktweise aufgezeichnet werden, wobei für die jeweiligen aufgezeichneten Punkte der Oberfläche des Gegenstandes Phasenwerte bestimmt und diese zur Berechnung von geometrischen Kenngrößen und räumlichen Koordinaten der Punkte verwendet werden, d a d u r c h   g e k e n n z e i c h n e t , daß die aus den mindestens zwei Richtungen auf den Gegenstand projizierten Lichtmuster oder Teile davon zusätzlich von mindestens einer zweiten Aufzeichnungsvorrichtung punktweise aufgezeichnet werden, wobei die mindestens eine zweite Aufzeichnungsanordnung ortsfest in Bezug auf den zu vermessenden Gegenstand verbleibt und daß aus den mit der zweiten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten Punkte der projizierten Lichtmuster mindestens vier Phasenmeßwerte bestimmt werden, aus denen die geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung für die mindestens zwei Richtungen der Projektion berechnet werden.
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
2.    Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß nach der Bestimmung der geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung die geome-

trischen Kenngrößen der ersten Aufzeichnungsvorrichtung unter Verwendung der geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung bei der jeweiligen Projektionsvorrichtung und von mindestens zwei Phasenmeßwerten berechnet werden, die aus den mit der ersten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten, aus der jeweiligen Richtung projizierten Lichtmustern bestimmt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß unter Verwendung der vorher bestimmten geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung und der ersten Aufzeichnungsvorrichtung und mindestens einem Phasenmeßwert, der aus den mit der ersten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten, aus der jeweiligen Richtung projizierten Lichtmustern bestimmt wird, die dreidimensionalen Koordinaten der jeweiligen Punkte des Gegenstandes berechnet werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß nach der Projektion der Lichtmuster aus einer ersten Richtung und Aufzeichnung der Ansicht des Gegenstandes aus einer ersten Richtung die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung für die Projektion aus einer zweiten Richtung und Aufzeichnung einer anderen Ansicht des Gegenstandes aus einer zweiten Richtung von einer ersten Position in eine zweite Position umgesetzt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Messung von unterschiedlichen Ansichten des Gegenstandes die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung gemeinsam in unterschiedliche Positionen umgesetzt werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung und der ersten Aufzeichnungsvorrichtung Orientierungsparameter sind.
7. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Phasenmeßwerte verwendet werden und jede räumliche Koordinate zweimal berechnet wird und eine Mittelung durchgeführt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Gegenstand aus jeder Projektionsrichtung in einem ersten Schritt mit einem Liniengitter und/oder Gray-Code-Sequenzen und in einem zweiten Schritt mit dem um  $90^\circ$  bezüglich der Projektionsrichtung verdrehten Liniengitter und/oder den um  $90^\circ$  verdrehten Gray-Code-Sequenzen beleuchtet wird.
9. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8 mit mindestens einer Sensoranordnung, die eine Lichtmuster projizierende Projektionsvorrichtung und eine erste zweidimensional auflösende Aufzeichnungsvorrichtung zum Aufzeichnen eines mit den Lichtmustern beleuchteten Gegenstandes aufweist, mit mindestens einer zweiten Aufzeichnungsvorrichtung zum Aufzeichnen des mit den Lichtmustern beleuchteten Gegenstandes, mit einem den zu vermessenden Gegenstand aufnehmenden Meßtisch und einer Auswerteeinrichtung zur Bestimmung von Kenngrößen des Meßsystems und/oder von räumlichen Koordinaten des Gegenstandes, wobei die mindestens eine zweite Aufzeichnungsvorrichtung in Bezug auf den auf dem Meßtisch aufgenommenen Gegenstand orts-

fest ist und die Sensoranordnung und der Gegenstand relativ zueinander beweglich sind.

- 5 10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung der Sensoranordnung fest miteinander verbunden sind.
- 10 11. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung der Sensoranordnung unabhängig voneinander beweglich und/oder umsetzbar sind.
- 15 12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensoranordnung auf einer Dreheinheit angeordnet ist, in deren Mittelpunkt sich der Meßtisch befindet und die Sensoranordnung eine Drehbewegung in Bezug auf den Gegenstand durchführt.
- 20 13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßtisch drehbar ist und die mindestens eine zweite Aufzeichnungsvorrichtung starr mit dem drehbaren Meßtisch verbunden ist, während die Sensoranordnung ortsfest angeordnet ist.
- 25 14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensoranordnung an einer um den Meßtisch vorzugsweise um  $360^\circ$  drehbare Führungsbahn frei positionierbar befestigt ist.
- 30 15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß eine Mehrzahl von zweiten Aufzeichnungsvorrichtungen ortsfest zu dem Meßtisch vorgesehen sind.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Aufzeichnungsvorrichtung mindestens drei Photodetektoren aufweist.

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT  
der angewandten Forschung e.V.

Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten  
eines Gegenstandes

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung  
der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes nach  
dem Oberbegriff des Hauptanspruchs sowie eine Vor-  
richtung zur Durchführung des Verfahrens.

10 Zur berührungslosen flächenhaften Erfassung von Ober-  
flächenformen, Oberflächengeometrien oder Koordinaten  
ausgewählter Punkte werden verschiedene optische  
Prinzipien eingesetzt. Allen Verfahren ist dabei ge-  
meinsam, daß die Bestimmung der 3-D-Koordinaten eines  
Oberflächenmeßpunktes nur dann möglich ist, wenn min-  
15 destens drei unabhängige Meßwerte für diesen Punkt  
vorliegen. Zusätzlich gehen Annahmen über die Geome-  
trie des Meßsystems in das Ergebnis ein.

20 Ein Verfahren ist die klassische Streifenprojektions-  
technik, die mit einer oder mehreren CCD-Kameras und



einem Projektor realisiert wird. (DE 41 20 115 C2, DE 41 15 445 A1. In derartigen Vorrichtungen werden die Gitterlinien oder Gray-Code-Sequenzen auf die zu vermessende Oberfläche projiziert. Eine CCD-Kamera registriert an jedem ihrer Empfänger-elemente die Intensität eines Bildpunktes auf der Oberfläche. Mit bekannten mathematischen Algorithmen werden aus den Intensitätsmeßwerten Phasenmeßwerte berechnet. Die gesuchten Objektkoordinaten können nachfolgend aus den Phasenmeßwerten und den Bildkoordinaten der Meßpunkte in der Bildebene des Aufnahmesystems berechnet werden. Voraussetzung dafür ist allerdings die Kenntnis der Geometrie des Meßsystems (Orientierungsparameter von Projektor und Kamera) sowie der Abbildungseigenschaften der Projektions- und Abbildungsoptik.

Die Anzahl der zu bestimmenden Orientierungsparameter läßt sich erheblich einschränken, wenn ausschließlich die Phasenmeßwerte zur Koordinatenberechnung verwendet werden. In solchen Systemen bestimmt die Lage eines einzelnen Empfänger-elementes im Aufnahmesystem ausschließlich den Meßort, wird aber als Meßinformation nicht ausgewertet. Durch Beleuchtung der Szene aus mehreren, aber mindestens drei Projektionsrichtungen mit Gitterlinien oder auch Gray-Code-Sequenzen und Beobachtung mit einer oder mehreren in Bezug zum Objekt fest positionierten Kameras, lassen sich beispielsweise Koordinaten bei bekannter Geometrie des Beleuchtungssystems berechnen. In allen diesen Systemen müssen die Systemparameter (Orientierungsparameter) separat erfaßt werden, wobei dies typischerweise durch eine sogenannte Vorabkalibrierung des Systems geschieht. Dabei werden Kalibrierkörper mit bekannter Geometrie vermessen, mit Hilfe derer die Geometrieparameter des Meßaufbaus modelliert werden (DE 195 36 297 A1). Unbrauchbar ist diese Vorgehensweise immer

dann, wenn Geometrieparameter in weiteren Messungen nicht konstant gehalten werden können, beispielsweise durch Temperatureinflüsse oder in Folge mechanischer Beanspruchung des Systems oder wenn bedingt durch die Komplexität der Meßaufgabe eine variable Sensoranordnung gefordert wird und daher eine Vermessung mit vorab festgelegter Anordnung nicht in Frage kommt.

Photogrammetrische Meßverfahren überwinden die Schwierigkeit einer separaten Einmeßprozedur. Als Meßinformationen dienen hier die Bildkoordinaten, also die Lage der Meßpunkte im Raster des Aufnahmesystems. Aus mindestens zwei unterschiedlichen Kamerapositionen müssen für einen Objektpunkt die Bildkoordinaten bekannt sein. Vorteilhaft bei diesen Messverfahren ist dabei, daß pro Meßpunkt ein überzähliger Meßwert gewonnen werden kann, d.h. bei zwei Kamerapositionen liegt ein Meßwert mehr vor, als für die Berechnung der drei Koordinaten eines Punktes erforderlich ist. Auf diese Weise ist es bei hinreichend vielen Meßpunkten möglich, simultan Koordinaten, innere und äußere Orientierungsparameter der Kameras sowie Korrekturparameter für die Verzeichnung zu berechnen. Schwierigkeiten ergeben sich jedoch bei dem Auffinden der dazu notwendigen homologen Punkten, vor allem für sehr viele Meßpunkte. Hierzu müssen in aufwendigen Bildverarbeitungsprozeduren Texturen oder Oberflächenstrukturierungen aus verschiedenen Aufnahmen in Verhältnisse gesetzt werden (DE 195 36 296 A1). Gerade für eine vollständige flächenhafte Erfassung einer Objektoberfläche ist dies nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Auch sind Markierungen als Verknüpfungspunkte für das Zusammenfügen der Teilansichten erforderlich.

In der DE 196 37 682 A1 wird ein System vorgeschla-

gen, welches diese Probleme überwindet. Dabei beleuchtet ein Projektionssystem die Szene mit einer Serie von Streifenbildern, bestehend aus zwei zueinander um  $90^\circ$  verdrehten Sequenzen. Solche aus zwei unterschiedlichen Positionen auf das Objekt projizierte Streifenbilder ermöglichen bei gleichzeitiger Beobachtung mit einer fest positionierten Kamera, eine Auswertung gemäß dem funktionalen Modell der Photogrammetrie. Nachteile dieses Systemkonzeptes ergeben sich vor allem bei der vollständigen Vermessung von komplexen Objekten. Mit der Komplexität des Meßobjektes steigt auch die Anzahl der notwendigen Ansichten. Es ist aber nicht sinnvoll, die Anzahl der Kameras zu erhöhen, da eine Meßinformation nur an einem Objektpunkt vorliegt, der sowohl aus zwei unterschiedlichen Richtungen beleuchtet wird, als auch von der Kamera beobachtet wird. Das Justieren des Meßsystems, d.h. das Einrichten der erforderlichen Kameras gestaltet sich darüber hinaus um so schwieriger, je mehr Ansichten eingerichtet werden müssen. Für komplexe Meßaufgaben ist ein solches vorausschauendes Einrichten des Sensorsystems nicht immer befriedigend möglich. Nachteilig bei bekannten Verfahren ist außerdem, daß das Ergebnis der Messung für eine Bewertung immer erst am Ende des kompletten Meßprozesses zur Verfügung steht. Eine Zwischenauswertung und darauf aufbauend eine angepaßte Positionierung des Projektors und der Kamera(s) ist dabei nicht möglich.

Aus der DE 100 25 741 A1 ist ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten von Gegenständen und/oder deren zeitlicher Änderung bekannt, bei dem der Gegenstand jeweils aus mindestens zwei Richtungen mit einer Serie von Lichtmustern beleuchtet wird, die mit einer zweidimensional auflösenden Sensoranordnung aufgezeichnet werden und zwar zur Erfassung unter-

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
schießlicher Ansichten bei unterschiedlichen Positionen der Sensoranordnung. Dabei wird bei einer neuen Position der Sensoranordnung mindestens eine Projektionsrichtung so gewählt, daß sie mit einer Projektionsrichtung der vorhergehenden Position der Sensoranordnung übereinstimmt. Bei diesen beiden Projektionsrichtungen sind die Phasenmeßwerte identisch und daraus kann eine Verknüpfungsvorschrift zwischen den Aufzeichnungspunkten der Sensoranordnung bei der neuen und der vorhergehenden Position bestimmt werden. Dieses System ist selbsteinmessend, d.h. es müssen vor einer Messung keinerlei geometrische oder optische Systemgrößen bekannt sein oder vorher kalibriert werden. Die Kalibrierung geschieht bei diesem bekannten Verfahren während des Messens, d.h. die Kalibrierkamera ist gleichzeitig die Meßkamera. Dieses Verfahren ist beispielsweise bei komplexen Objekten nicht zufriedenstellend, da Abschattungen nicht zu vermeiden sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes zu schaffen, mit der eine Vermessung von komplexen Gegenständen ohne Markierungen oder Texturen, ohne das Auffinden von homologen Punkten und ohne daß geometrische oder optische Systemgrößen bekannt sein oder vorher kalibriert werden müssen, möglich ist, wobei die Anzahl der möglichen Aufnahmegerichtungen nicht durch die Anzahl der Kameras begrenzt ist und wobei die Meßzeit verringert werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des Hauptanspruchs gelöst.

Dadurch, daß die aus den mindestens zwei Richtungen

auf den Gegenstand projizierten Lichtmuster nicht nur jeweils von einer zugeordneten ersten Aufzeichnungsvorrichtung sondern zusätzlich von mindestens einer zweiten Aufzeichnungsvorrichtung punktweise als Bild erfaßt werden, wobei die mindestens eine zweite Aufzeichnungsvorrichtung ortsfest in Bezug auf den zu vermessenden Gegenstand verbleibt und nicht wie die Projektionsvorrichtung und die erste Aufzeichnungsvorrichtung versetzt wird und daß aus den mit der zweiten Aufzeichnungsvorrichtung aufgezeichneten Punkten der projizierten Lichtmuster mindestens vier Phasenmeßwerte bestimmt werden, aus denen die Parameter der Projektionsvorrichtung für alle Richtungen der Projektion bestimmt werden, ist es möglich, eine Kalibrierung des Systems in getrennter Weise zum Messen vorzunehmen. Der Gegenstand kann aus einer beliebigen Anzahl von Richtungen aufgrund der frei beweglichen Sensoranordnung, bestehend aus Projektionsvorrichtung und erster Aufzeichnungsvorrichtung erfaßt werden. Die für die Kalibrierung notwendigen Daten werden während der Meßwertaufnahme erfaßt, wobei eine Trennung zwischen stationärer Kalibrierkamera und beweglicher Meßkamera realisiert wird. Dies erhöht die Flexibilität der Meßanordnung im Sinne eines mobilen Sensors. Die Anzahl der zu digitalisierenden Objektansichten ist prinzipiell frei und nicht auf die Anzahl der verwendeten Kameras beschränkt, sondern kann größer gewählt werden. Durch die Selbstkalibrierung kann die messende Sensoranordnung während des Meßablaufs mechanischen Änderungen unterliegen, ohne daß diese das Meßergebnis beeinflussen.

Da für die Bestimmung der geometrischen Kenngrößen der Projektionsvorrichtung vier Phasenmeßwerte, für die der ersten Aufzeichnungsvorrichtung nur zwei Phasenmeßwerte und für die Berechnung der dreidimensio-

nalen Koordinaten nur ein Phasenmeßwert notwendig sind, kann die Meßzeit erheblich verkürzt werden.

5 Durch die in den Unteransprüchen angegebenen Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen möglich.

10 Insgesamt können mit dem erfindungsgemäße Verfahren komplexe Gegenstände vermessen werden. Es werden keine objektfesten oder speziell projizierte Paßmarken oder auch besondere Objekteigenschaften für das Auf-  
finden der homologen Punkte zur Bildmontage benötigt. Aufwendige Matching-Prozeduren entfallen deswegen  
15 vollständig. Demgegenüber stehen über das Pixelraster der stationären Kalibrierkamera(s) freie virtuelle Marken zur Verfügung. Eine Objektinteraktion wird somit vermieden. Es können technisch sehr einfache automatische Meßsysteme aufgebaut werden. Trotzdem sind  
20 diese in der Lage komplexe Objekte vollständig und flächenhaft zu erfassen. Für die Standortänderung der Sensoranordnung sind keine teuren, genauen Führungsmittel bzw. Handling-Systeme notwendig. Für die Zuordnung von Teilbereichen zum gesamten dreidimensionalen Bild ist keine Überlappung der mit der Sensoranordnung jeweils erfaßten Teilbereiche notwendig.

25 Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

30 Fig. 1 eine schematische Darstellung des Meßablaufs entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren,

35 Fig. 2 ein erstes Ausführungsbeispiel einer bei dem erfindungsgemäßen Verfahren verwendeten Meßvorrichtung,

Fig. 3 ein zweites Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 4 ein drittes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 5 ein viertes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 6 ein fünftes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, und

Fig. 7 ein sechstes Ausführungsbeispiel einer Meßvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird im Folgenden unter Heranziehung der Fign. 1, 2 und 3 beschrieben. Der zu vermessende Gegenstand 1 bzw. das Objekt ist beispielsweise auf einem Meßtisch befestigt und wird von einem einen Bestandteil einer Sensoranordnung 2 bildenden Projektor 3 auf einem Stativ beleuchtet. Eine gleichfalls Bestandteil der Sensoranordnung 2 bildende Kamera 4 nimmt das Bild des beleuchteten Objektes 1 bzw. des Objektbereichs auf. Im Ausführungsbeispiel ist die als Kamera ausgebildete Aufzeichnungsvorrichtung eine CCD-Kamera auf einem Stativ.

In der Fig. 2 sind der Projektor 3 und die Kamera 4 voneinander unabhängig, während in Fig. 3 Projektor 3 und Kamera 4 auf einem Stativ miteinander starr ver-

bunden sind, was zu einer Vereinfachung der Meßwertaufnahme führt. Die Fign. 2 und 3 zeigen die Sensoranordnung 2 in zwei verschiedenen Positionen, wobei die Position 1 mit durchgezogenen Linien dargestellt ist und die Position 2 mit gestrichelten Linien ausgeführt ist.

Der Projektor 3 projiziert auf das zu vermessende Objekt 1 oder einen Objektbereich Lichtmuster, die als Liniengitter und/oder Gray-Code-Sequenzen ausgebildet sind. Die Kamera 4 registriert an jedem ihrer Empfängererelemente die Intensität der auf dem Objekt 1 abgebildeten Streifenbilder als Meßwerte. Anschließend wird das Gitter und/oder die Gray-Code-Sequenz um  $90^\circ$  gedreht und erneut auf den Gegenstand 1 projiziert, wobei die Drehachse parallel zur optischen Achse des Projektionssystems liegt.

Weiterhin ist eine sogenannte Kalibrierkamera 5 vorgesehen, die gleichfalls als CCD-Kamera ausgebildet ist und Bilder des Objekts 1 bzw. eines Objektbereichs aufnimmt. Anstelle der Kalibrierkamera können auch Photodetektoren vorgesehen sein und da nur eine begrenzte Anzahl von Meßpunkten aufgenommen werden muß, müssen als Mindestanzahl nur drei Photodektoren verwendet werden.

In Fig. 1 sind die prinzipiellen Beziehungen beim Meßablauf dargestellt. Von der Sensorposition 1, die in den Fign. 2 und 3 mit durchgezogenen Linien gekennzeichnet ist, werden, wie oben ausgeführt, Lichtmuster mittels des Projektors 3 derart auf das Objekt 1 projiziert, daß zwei um einen Winkel (im Optimum um  $90^\circ$ ) zueinander verdrehten Phasenfelder erhalten werden, wodurch jeder Meßpunkt auf dem Objekt 1 mit zwei Phasenwerten signalisiert wird. Der Projektor 3 pro-



jiziert beispielsweise auf das zu vermessende Objekt 1 oder einen Objektbereich eine Serie von zwei Struktursequenzen von phasenverschobenen Gitterlinien und/oder Gray-Code-Sequenzen, wobei die beiden Sequenzen die Verdrehung gegeneinander um  $90^\circ$  aufweisen. Ebenso wie die Meßkamera 4 nimmt die Kalibrierkamera 5 an jedem ihrer Empfängererelemente die Intensitätsmeßwerte der Einzelbilder der Sequenzen auf.

Mit bekannten Algorithmen der Streifenbilddauswertung lassen sich aus den mit der Meßkamera 4 und der Kalibrierkamera 5 aufgezeichneten Bildern Phasenmeßwerte, die den Koordinaten in der Gitterebene des Projektionssystems entsprechen, an jedem Kamerapixelpunkt sowohl für die Meßkamera 4 als auch für die Kalibrierkamera 5 berechnet, wobei durch die gewählte Art der Streifenprojektion, z.B. verdrehte Gittersequenzen an dem beobachteten Punkt des Gegenstandes 1 bis zu zwei Phasenmeßwerte pro Beleuchtungsrichtung gewonnen werden.

Im nachfolgenden Schritt wird die Sensoranordnung 2 von der Sensorposition 1 in eine beliebige andere Position versetzt, wobei diese Position 2 in Fig. 2 und Fig. 3 durch die gestrichelten Linien dargestellt ist. Dabei bleibt der Standpunkt der Kalibrierkamera 5 relativ zum Gegenstand 1 unverändert. Von dieser neuen Position der Sensoranordnung 2 werden von dem Projektor 3 weitere Struktursequenzen bzw. Gitterlinien in gleicher Weise, wie oben aufgeführt, auf das Objekt 1 bzw. den Objektbereich projiziert, wobei wiederum sowohl die Meßkamera 4 als auch die Kalibrierkamera 5 die Bildsequenzen bzw. Teile davon simultan aufnehmen.

Dieser Vorgang des Umsetzens der Sensoranordnung 2 in

weitere Positionen kann solange wiederholt werden, bis jeder zu vermessende Bereich des Gegenstandes mindestens einmal von der Sensoranordnung 2 erfaßt, d.h. von dem Projektor 3 ausgeleuchtet und gleichzeitig mit der Meßkamera 4 beobachtet worden ist. Dabei kann die Meßwertaufnahme an den verschiedenen Positionen aufeinander folgend und anschließend die notwendigen Berechnungen durchgeführt werden. Es können jedoch auch Berechnungen nach jeder neuen Position vorgenommen werden.

Die Sensoranordnung 2 und die Kalibrierkamera 5 sind mit einer Auswerteeinrichtung verbunden, in der die notwendigen mathematischen Berechnungen für die Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten des Gegenstandes durchgeführt werden. Dazu ist für die Auswertung der Phaseninformation erforderlich, daß die Geometrieparameter des Projektionssystems bekannt sind. Die Raumlage der einzelnen Projektorpositionen wird durch sechs äußere Orientierungsparameter (drei Koordinaten der Projektionszentren, drei Euler'sche Drehwinkel um die mitgedrehten Koordinatenachsen) festgelegt. Zur Berechnung dieser Geometrie Größen wird mit funktionalen Modellen der Programmetrie ein Gleichungssystem aufgestellt. Als Eingangsgrößen dienen die vier gemessenen bzw. aus den Meßwerten berechneten Phasenwerte. Auch die Raumlage der Meßkamera 4, die gleichfalls durch Orientierungsparameter bestimmt ist, wird über die Auswerteeinrichtung ermittelt. Dabei werden die Kenntnisse über die Projektionsvorrichtung sowie zwei Phasenmeßwerte verwendet.

Der Auswerteprozess soll unter Heranziehung der Fig. 1 im Folgenden erläutert werden. Wie schon ausgeführt wurde, ist die Grundbedingung für die Datenauswertung, daß der Projektor 3 die von der stationären Ka-

librierkamera 5 eingesehenen Bereiche des Gegenstandes 1 aus mindestens zwei Positionen signalisiert. Weiterhin muß beachtet werden, daß die Intensitätsmeßwerte für alle Beleuchtungspositionen von der Kalibrierkamera 5 immer an dem gleichen Objektpunkt  $O_k$  auf der Oberfläche des Gegenstandes 1 registriert werden, d.h. es darf keine Relativbewegung zwischen Gegenstand 1 und der Kalibrierkamera 5 stattfinden. In Fig. 1 wird diese Bedingung anhand der Strahlen 6, 7, 8 dargestellt, die alle auf den Objektpunkt  $O_k$  treffen. Die mitbewegte Meßkamera 4 hingegen erfaßt für jede Position 1 ( $1 = 1 \dots n$ ) unterschiedliche Bereiche  $O_1$ . Zur Vereinfachung ist in der schematischen Darstellung der Fig. 1 aus diesen Objektbereichen immer nur ein Punkt  $O_1$  bzw.  $O_2$  gezeichnet.

Die Auswertung des Meßvorganges zur Bestimmung der 3-D-Koordinaten der Oberfläche des Gegenstandes 1 ist ein dreistufiger Prozeß. Dabei werden prinzipiell erst alle Projektorpositionen berechnet, d.h. kalibriert, dann werden alle Meßkamerapositionen und abschließend die 3-D-Koordinaten der von den Positionen der Sensoranordnung 2 erfaßten Koordinaten des Gegenstandes berechnet. Dies geschieht, wie oben ausgeführt, nach der gesamten Meßwertaufnahme oder zwischen der Meßwertaufnahme an unterschiedlichen Positionen.

Erster Auswerteschritt:

In einem ersten Auswerteschritt werden unter Verwendung der mit der stationären Kalibrierkamera 5 an den Bildelementen  $(i^m_k, j^m_k)$  aufgenommenen Projektorbildkoordinaten  $(\xi^p_{1,k}, \eta^p_{1,k})$ , d.h. Phasenmeßwerten, die den Objektpunkt  $O_k$  beschreiben, die äußeren und inneren Orientierungsparameter für alle Projektorpositio-

nen 1 mittels bekannter Methoden des Bündelblockausgleichs berechnet. Grundbedingung hierfür ist, wie oben ausgeführt, daß für die stationäre Kamera mindestens vier Phasenbilder zur Verfügung stehen, die bei Projektion aus mindestens zwei unterschiedlichen Projektorpositionen 1 generiert wurden. Für jede Projektorposition werden somit die sechs äußeren Orientierungsparameter berechnet, die als Geometrieparameter der Projektoren dienen und die Raumlage der einzelnen Projektorpositionen beschreiben. Diese Berechnung kann als Kalibrierung verstanden werden. Die Kalibrierkamera als Übersichtskamera dient somit zum Registrieren der homologen Punkte bzw. ihre Pixel als "virtuelle homologe Punkte".

Bisher wurde nur von einer Kalibrierkamera 5 gesprochen. Es können jedoch eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 vorgesehen sein, die in fester Beziehung zu dem Objektpunkt stehen, wobei die Anzahl der Kameras mit  $m$  ( $m \geq 1$ ) bezeichnet ist. Diese Kalibrierkameras 5 sind in unterschiedlichen Beobachtungspositionen angeordnet und es kann somit ein größerer Objektbereich erfaßt werden, d.h. kompliziertere Gegenstände ausgemessen werden.

Zweiter Auswerteschritt:

In der Position 1 der Sensoranordnung 2 nimmt die Kamera 4 mit ihrem Raster aus Empfängerelementen den Gegenstand 1 auf, wobei hier ein Punkt  $O_1$  aus dem Bereich herausgegriffen ist, der über die Strahlen 9 und 10 gekennzeichnet ist. An dem Pixelpunkt  $(\xi_1^K, \eta_1^K)$  der Kamera 4 werden zwei Meßinformationen  $(\xi_{1,1}^P, \eta_{1,1}^P)$  in Form von Phasenmeßwerten gewonnen, die den Projektorbildkoordinaten in der Gitterebene entsprechen. Aus diesen Informationen und den im ersten Aus-

werteschrift berechneten Orientierungsparametern des Projektors 3 an der Position 1 werden die Orientierungsparameter der Meßkamera 4 an der Position 1 über einen freien Bündelausgleich berechnet, d.h. die Meßkamera wird bezüglich ihrer Position kalibriert. Dabei wird nicht nur ein Punkt  $O_1$  aus dem erfaßten Objektbereich verwendet, sondern es können bis zu  $(i \times j)$  Punkte verwendet werden, wobei  $i \times j$  die Pixelzahl der Meßkamera 4 in Zeilen- und Spaltenrichtung ist.

Hiernach stehen die notwendigen die Sensoranordnung 2 an der Position 1 beschreibenden Orientierungsparameter zur Verfügung, wobei mit dem ersten Auswerteschritt der Projektor 3 und mit dem zweiten Auswerteschritt die Kamera 4 an dieser Position kalibriert wurden.

#### Dritter Auswerteschritt:

Unter Verwendung der Orientierungsparameter des Projektors 3 und der Kamera 4 an der Position 1 werden durch klassische Triangulation aus den Phasenbildern die dreidimensionalen Koordinaten des Punktes  $O_1$  und entsprechend aller von der Kamera 4 sichtbaren Objektpunkte  $(i \times j)$  in dieser Position 1 bzw. Ansicht 1 berechnet werden. Da der Objektpunkt durch zwei Gittersequenzen signalisiert wurde und somit zwei Phasenbilder zur Verfügung stehen, jedoch nur ein Phasenmeßwert notwendig ist, besteht prinzipiell die Möglichkeit, jeden Punkt zweimal zu berechnen und über eine Mittelung zu verrechnen, wodurch die Koordinatenmeßgenauigkeit erhöht wird.

Die Auswerteschritte zwei und drei werden für die Position 2 der Sensoranordnung 2 und nachfolgend schrittweise für alle folgenden Positionen durchge-

führt. Im Ergebnis wird eine 3-D-Punktewolke des Gegenstandes mit der Meßkamera 4 aus 1 Beobachtungspositionen und, wenn eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 vorhanden ist, zusätzlich aus m Beobachtungspositionen gewonnen.

In den Fig. 4 bis 7 sind weitere Möglichkeiten einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens dargestellt. In Fig. 4 sind eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 an einem Gestell 11 befestigt, unter dem das Objekt 1 angeordnet ist und das aus zwei portalartigen parallel angeordneten Trägerelementen 12 und einem die Trägerelemente 12 verbindenden Querbalken 13 besteht. An dem Querbalken 13 ist die Sensoranordnung 2 an einem in allen Raumrichtungen drehbaren Drehteil 14 befestigt, wobei auch die Kamera und/oder der Projektor 3 in ihrem Winkel zur Vertikalen verändert werden können.

In Fig. 5 ist der Gegenstand 1 auf einem Meßtisch 15 angeordnet und eine Kalibrierkamera 5 ist oberhalb des Objektes fest an einem Gestell 16 befestigt. Die Sensoranordnung 2 ist wiederum an einer Dreheinheit 17 befestigt, in deren Drehachse sich der Meßtisch 16 befindet. Die Sensoranordnung dreht sich somit in einem Winkel zur Vertikalen um den Gegenstand 1 herum.

In Fig. 6 ist der Meßtisch in Form eines Drehtisches 18 ausgebildet, der zu einer Basis 19 drehbar ist. An dem Drehtisch ist über einen Arm 20 die Kalibrierkamera 5 derart befestigt, daß sie über dem Gegenstand 1 steht. Meßkamera 4 und Projektor 3 der Sensoranordnung 2 sind an einem Balken 21 befestigt, der starr mit der Basis 19 verbunden ist.

Schließlich ist in Fig. 7 eine weitere Vorrichtung

zur Durchführung des Verfahrens dargestellt. Dabei ist die Sensoranordnung 2 an einer um das Objekt 1 drehbaren kreisförmigen Führungsbahn 22 derart befestigt, daß sie sich auf der Führungsbahn auf dem Halbkreis bewegen kann und frei positionierbar ist, wobei die Führungsbahn 22 um das Objekt 1 um einen Winkel von bis zu  $360^\circ$  frei drehbar ist. An einem die Führungsbahn umgebenden Gestell 23 sind eine Mehrzahl von Kalibrierkameras 5 befestigt. Es kann somit sowohl die Ober- als auch die Unterseite des Gegenstandes 1 erfaßt werden.

Zusammenfassung:

Es wird ein Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten eines Gegenstandes vorgeschlagen, bei dem der Gegenstand mit einer Projektionsvorrichtung aus mindestens zwei Richtungen mit Lichtmustern beleuchtet wird. Eine Kalibrierkamera und mindestens eine Meßkamera zeichnen die projizierten Lichtmuster auf den Gegenstand zumindest teilweise auf, wobei die Kalibrierkamera in Bezug auf den Gegenstand ortsfest ist. Mittels mindestens vier Phasenmeßwerte wird die Kalibrierung der Projektionsvorrichtung vorgenommen, anschließend wird unter Verwendung von mindestens zwei Phasenmeßwerten die Meßkamera kalibriert und schließlich werden unter Verwendung von mindestens einem Phasenmeßwert die dreidimensionalen Koordinaten des Gegenstandes berechnet. Die Projektionsvorrichtung und die Meßkamera werden dabei zusammen in die gewünschten Positionen umgesetzt.

(Fig. 1)



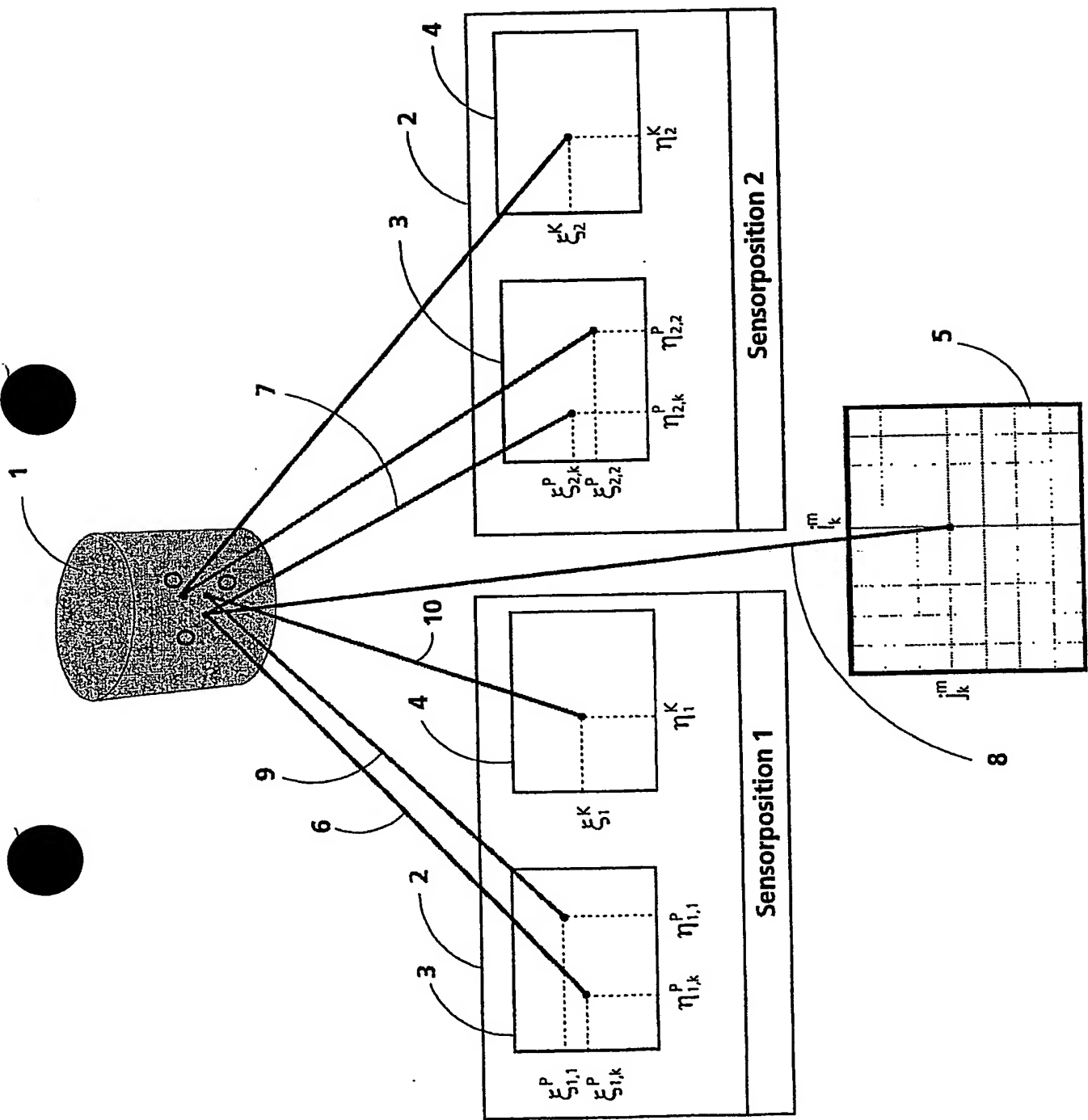


Fig.1.

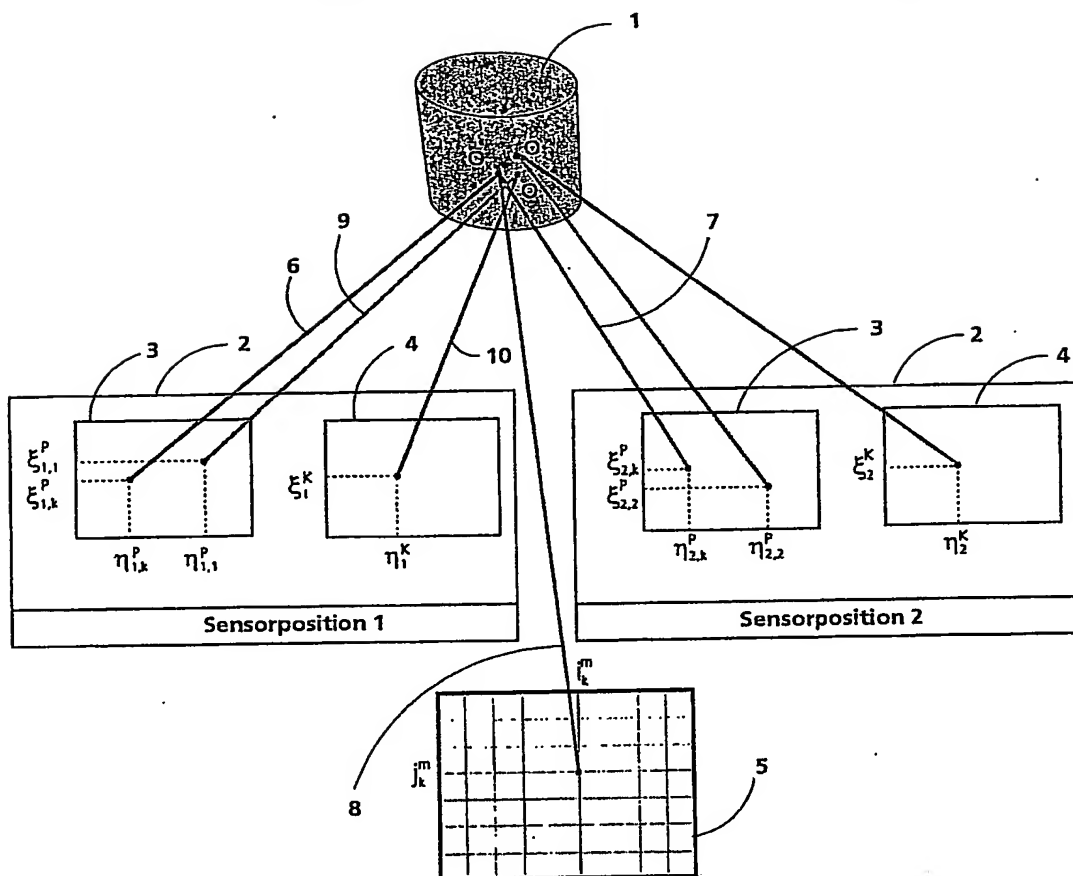


Fig.1.

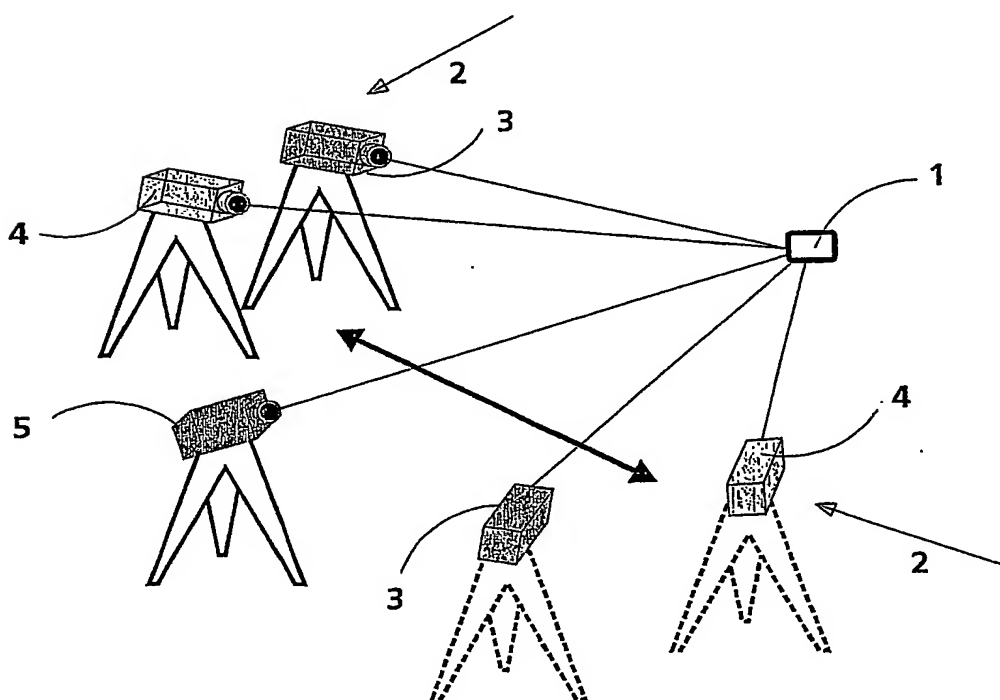


Fig.2

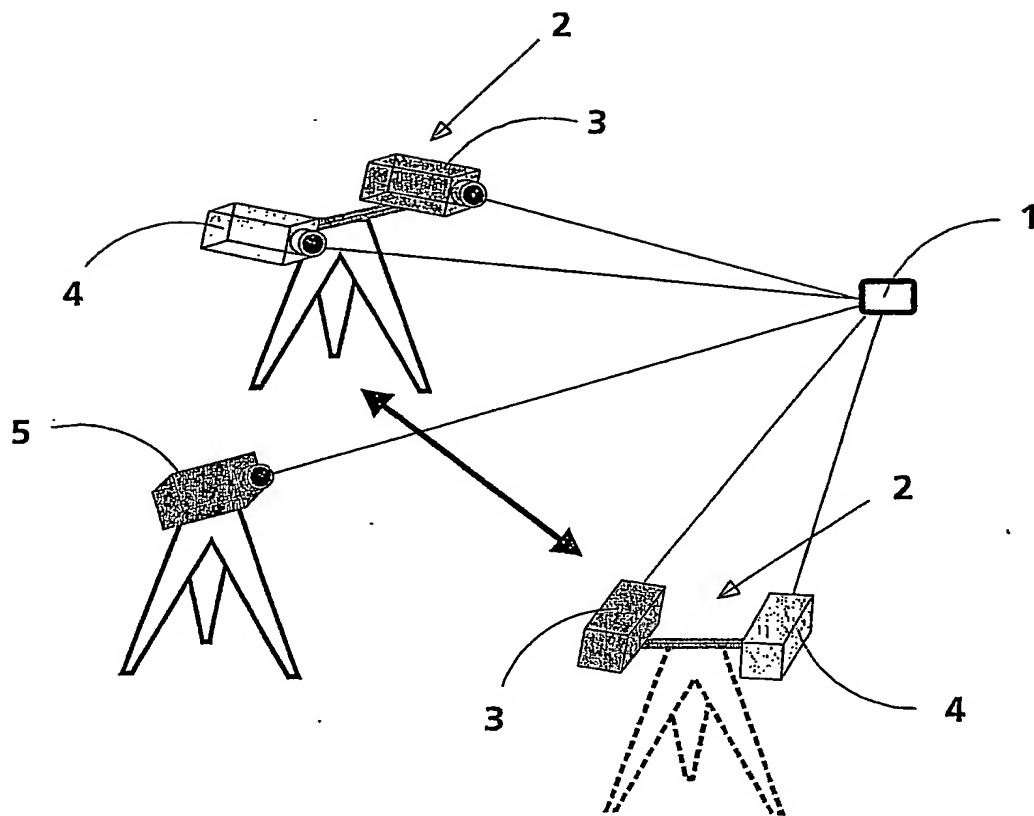


Fig.3

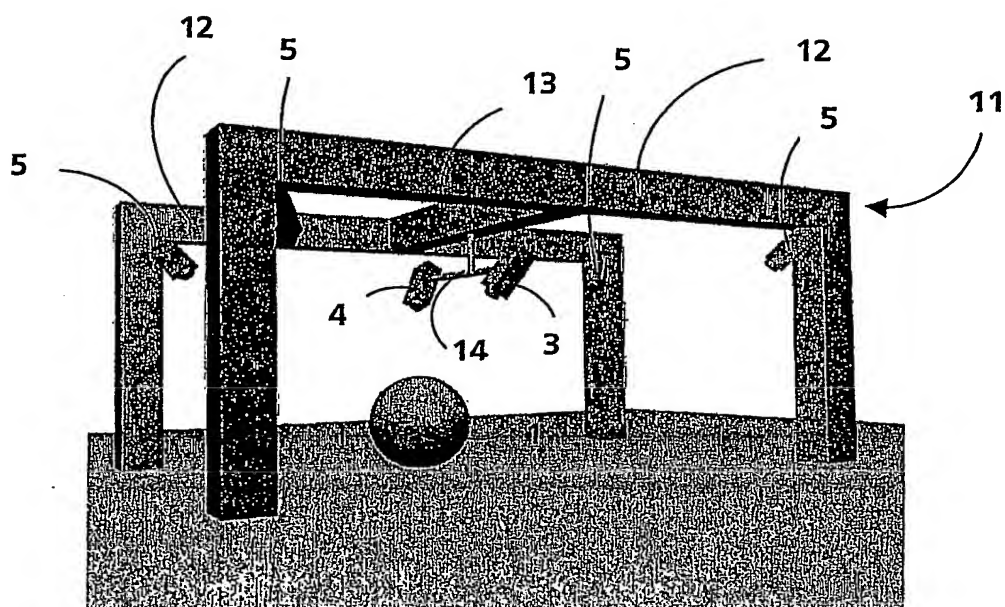


Fig.4

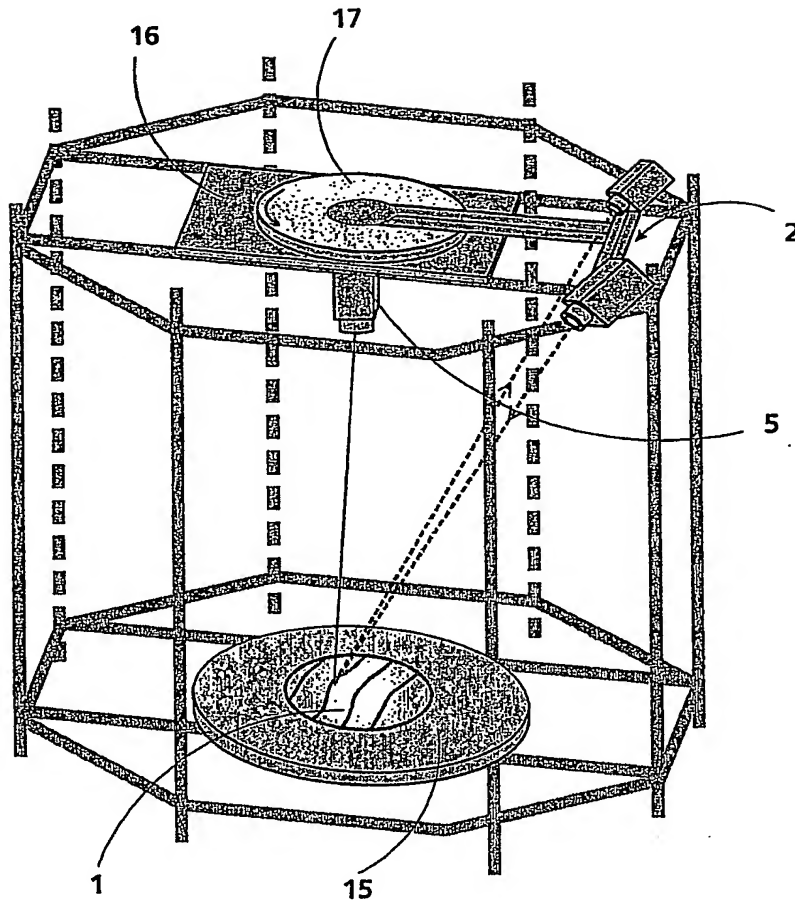


Fig. 5

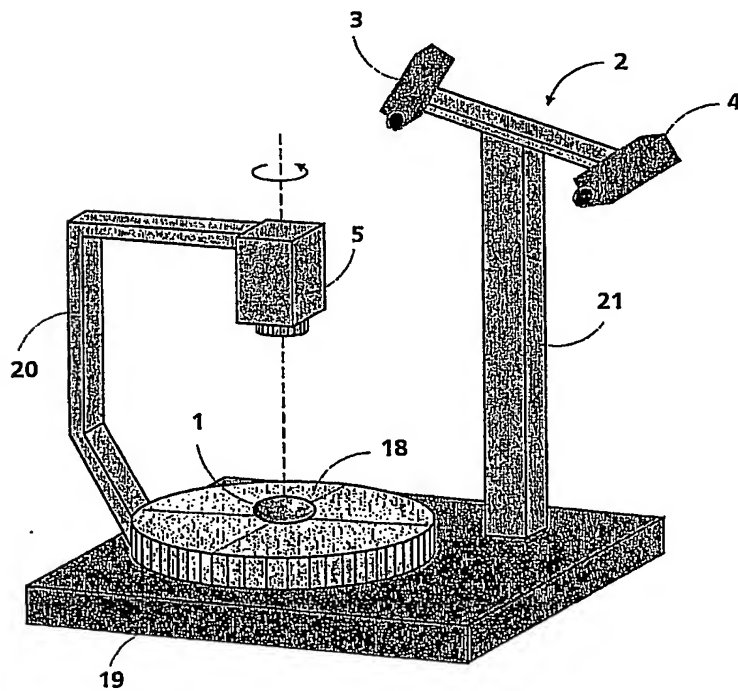


Fig. 6

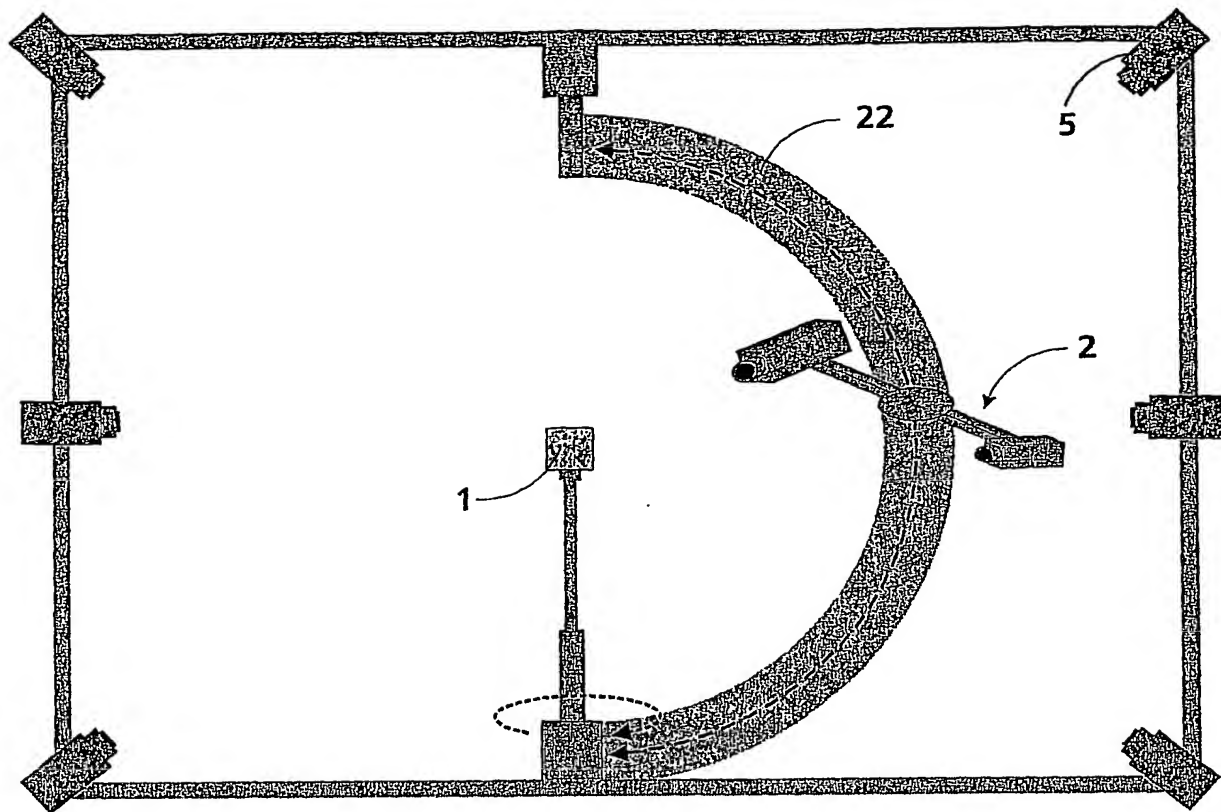


Fig.7

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**